

# Faz-MIMO Sistemlerinde Geliş Açısı Kestirim Performansı Karşılaştırması

## A Comparison of Direction of Arrival Estimation Performance for Phased-MIMO Systems

M. Umut Bahçeci<sup>\*†</sup>, Alper Güngör<sup>\*‡</sup>, Çağrı Çetintepe<sup>\*</sup> ve T. Engin Tuncer<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Aselsan Araştırma Merkezi, ASELSAN, Ankara, Türkiye

<sup>†</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>‡</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

{mubahceci, alpergungor, csetintepe}@aselsan.com.tr, etuncer@metu.edu.tr

**Özetçe** —Bu çalışmada, literatürde yer alan Fazlı Çoklu Giriş-Çoklu Çıkış (*Fazlı-MIMO*) dizi konsepti ile Sıkıştırılmış Algılama (SA) teknikleri ilk defa birlikte ele alınarak bir radar sisteminde çoklu hedefler için geliş açısı kestirim (GAK) problemi özgün olarak ele alınmıştır. Göndermeç tarafında ortalama güç kısıtları gözetilerek farklı alt dizi sayıları için geleneksel huzme şekillendirme ve rasgele fazlı ağırlıklı tasarım yöntemleri incelenmiş; almaç tarafında ise huzme şekillendirme, ayrık SA ve grup SA olmak üzere üç farklı geri çatım yöntemi ile çoklu hedefler için GAK başarımı araştırılmıştır. Anılan her senaryo için farklı Sinyal-Gürültü-Oranları (SGO) altında gerçekleştirilen parametrik Monte Carlo benzetimleri ile hedef başına hata sonuçları elde edilmiştir. Düşük SGO durumunda, Fazlı-MIMO ve SA teknikleri birlikte kullanılarak GAK başarımının artırılabilceği gösterilmiştir. Ayrıca grup seyreklik çözümü ile ayrık çözüme kıyasla kestirim hatasında 3 kata kadar bir azalma sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—geliş açısı kestirimi, fazlı dizi, MIMO, faz-MIMO, sıkıştırılmış algılama, huzme şekillendirme.

**Abstract**—This work combines the Phased-Multiple-Input-Multiple-Output (PH-MIMO) array and Compressive Sensing (CS) concepts from the literature, for the first time, and investigates direction of arrival (DoA) estimation problem of multiple targets in a such radar system. Transmitter model incorporates a phased-MIMO array with the number of subarrays taken as a parameter, and considers classical beamforming and random phase weight design approaches while placing an average power restriction on each antenna element. Receiver model evaluates three different reconstruction methods, namely beamforming, individual CS and group CS, for DoA performance assessment of multiple targets. Parametric Monte Carlo simulations are conducted to quantify angle error variance per target for each system configuration at different signal-to-noise (SNR) ratios. Simulation results demonstrate that a joint use of PH-MIMO and CS techniques can boost DoA performance at low SNRs, and that group sparsity solution can outperform individual solutions in terms of angle estimation error by a factor of three.

**Keywords**—Direction of arrival, phased array, MIMO, phased-MIMO, compressed sensing, beamforming

### I. GİRİŞ

Geliş açısı kestirimi, başta radar ve haberleşme sistemleri olmak üzere birçok alanda kullanılan bir tekniktir [1].

Geçmişte donanım kısıtları nedeniyle geliş açısı kestiriminde ardışık huzmeleme veya tek-darbe [2] anten sistemleri kullanılmıyken, teknolojik ilerlemelerle birlikte bu sistemler fazlı dizilere evrilmiştir. Mekanik tarama yerine elektronik huzme yönlendirmesi gerçekleştiren fazlı diziler ile açı uzayını birçok anten kanalı ile örneklemek mümkün hale gelmiştir [3]. MIMO sistemler, anten kanallarından farklı ve birbirine dik işaretler göndererek sahip olduğu dalgabıçımı farklılığı ile geliş açısı kestiriminde daha yüksek başarımlar sunabilmektedir [4]. Bununla birlikte, almaç tarafında birçok uyumlu süzgeç kullanılması nedeniyle MIMO sistemleri fazlı dizi antenlere kıyasla daha düşük Sinyal-Gürültü-Oranı (SGO) sergilemektedir.

Fazlı dizi sistemlerde bir veya birden fazla göndermeç huzmesi açı uzayını aydınlatmakta, hedeften yansıyan işaretler almaç tarafında evreyuymulu entegrasyon ile işlenmektedir [3]. Faz bilgisinin korunduğu evreyuymulu sinyal işleme sayesinde MIMO sistemlere göre daha yüksek SGO elde edilmektedir. MIMO sistemler ise fazlı dizi sistemlere kıyasla daha fazla hedef tespit edebilmekte, dalgabıçımı farklılığı ile açı kestirimini iyileştirebilmekte ve göndermeç-almaç yapılanmalarında esneklik sağlamaktadır [5]. Fazlı dizi ve MIMO sistemlerinin güçlü yönlerini birleştiren ve sistem karmaşasını dengeleyen melez sistemler de literatürde yer almaktadır [6]. Örneğin [7]'de, MIMO sistemlerin barındırdığı dalgabıçımı çeşitliliği ile fazlı dizilerin sahip olduğu evreyuymulu entegrasyon yetenekleri birleştirilmekte, oluşturulan huzmelerin yönlülüğünde ve yan huzme seviyelerinde iyileşmeler gösterilmektedir.

Sıkıştırılmış Algılama (SA) seyrek sinyallerin düşük sayıda ölçümden geriçatımını sağlayan bir sinyal işleme tekniğidir. Radar sistemlerinin doğası gereği aranan hedef sayısı, açı uzayı ızgara nokta sayısından çok daha düşüktür. Bu sebeple SA tabanlı yöntemler geliş açısı kestirimi için uygulanabilmektedir [8]. Klasik sinyal işleme sistemlerinin aksine, SA yöntemleri daha az ölçüm ile arzulanan işaretin geriçatımını sağlar. Geliş açısı kestirimi özelinde azaltılmış ölçüm sayısı daha az sayıda anten kullanmaya veya huzme oluşturmaya karşılık gelmektedir. Bu yaklaşımlar boyut, ağırlık, güç tüketimi ve maliyet açısından avantajlar sağlamakla beraber, seyretilmeden ötürü SGO azalmaktadır. Bu nedenle literatürde enstantane sayısını azaltma veya göndermeç tarafında çıkış gücünü asgariye indirme gibi yaklaşımlar yerine, belli bir güç tüketimi

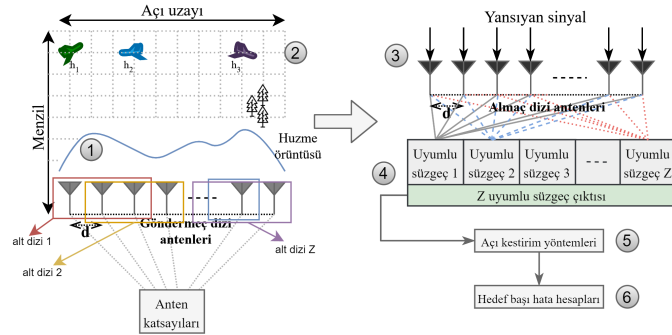
için açı kestirimi başarımının iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [9].

Faz-MIMO (*PH-MIMO*) melez sisteminin [7] geliş açısı kestirimi üzerinde bir çalışma yapılmak istenmiştir. Önerilen sistemin sunduğu SGO - bilgi ödünleşiminden dolayı, SA tabanlı geliş açısı kestirimi için uygun bir zemin sağladığı değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, *PH-MIMO* sisteminin geliş açısı kestirim başarımı detaylıca incelenmiştir. Çalışmanın katkıları şu şekilde sıralanabilmektedir: 1) *PH-MIMO* sisteminin geliş açısı kestirim başarımı için klasik huzme biçimlendirme ve rasgele fazlı (*RF*) uyarımlar, göndermeç tarafında kullanılarak, geriçatım tarafında huzme şekillendirme ve SA tabanlı teknikler kullanılmış ve elde edilen geliş açısı kestirim sonuçları ve SGO değerleri sunulmuştur, 2) elde edilen sonuçlar üzerinden, alt dizilerin getirdiği donanım ve hesaplama karmaşıklığı ile geliş açısı kestirim başarım doğruluğu arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Kısım II'de radar sistem modeli ve geriçatım modeli tanıtılmaktadır. Kısım III'te, göndermeç için kullanılan anten katsayı yöntemleri, hedef oluşturma detayları, Sinyal-Gürültü-Oranı tanımı, geriçatım yöntemleri ve açı hatası tanımı verilmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları ve göndermeç güç kısıtlamaları altında farklı SGO incelemeleri Kısım IV'te sunulmaktadır.

## II. RADAR SİSTEM MODELİ

Şekil 1'de betimlenen radar sistem modelinde, göndermeç ve almaç olmak üzere iki ana dizi bulunmaktadır. Göndermeç dizisindeki antenlere farklı genlik ve faz uygulanarak göndermeç huzme şekillendirmesi sağlanır (#1). Oluşturulan göndermeç huzmesi, açı uzayındaki hedefleri aydınlatır (#2). Hedeflerden yansıyan sinyal almaç dizisi tarafından alınıp (#3), uyumlu süzgeçlerden geçirilir ve örneklenir (#4). Son olarak, bilgisayar ortamında geliş açısı kestirim algoritmaları koşturulur ve hedef başı hata hesabı yapılır (#5-6).



Şekil 1: Radar sistem modeli.

### A. Dizi Geometrisi

Şekil 1'de, antenler z-ekseni doğrultusunda yarım dalga-boyu adımlarla ( $d = \lambda/2$ ) dizilmiş ve açı kestirim işlemleri yükseliş için uygulanmıştır. Ayrıca hedeflerin uzak alanda ve eş menzilde yer aldıkları varsayılmış, hedeflerden yansıyan sinyallerin düzlemsel dalga cephesi ile almaç antenlerine ulaştığı farz edilmiştir.

### B. Göndermeç Sinyal Modeli

*PH-MIMO* göndermeç dizisi birbiriyle örtüşebilen  $Z$  adet alt diziden oluşmaktadır. Altdizilerden her biri belli bir dalga-biçimi yaymakta ve ayarlanabilir uyarım katsayıları ile altdizi

seviyesinde huzme şekillendirmesi sağlanmaktadır. Her altdiziden birbirine dik dalga-biçimleri üretilmekte ve ilgili huzmeler aynı açı ızgara noktasına yönlendirilmektedir [7]. Toplam ışıma örüntüsü  $Z$  adet evreyuysuz huzmenin birleşiminden oluşmaktadır.

Hedeflerin yer aldığı açı uzayı  $N_g$  ızgara noktasına bölündüğünde ve her ızgara noktasına denk gelen açı  $\theta_j$  ile ifade edildiğinde ilgili ızgara noktalarındaki huzme örüntüsü

$$f(\theta_j) = \mathbf{w}_j^H \mathbf{A}_j, \quad 1 \leq j \leq N_g \quad (1)$$

ile hesaplanabilmektedir. Denklem (1)'de  $\mathbf{w}_j \in \mathbb{C}^{M \times 1}$   $i$  numaralı huzme için göndermeç anten katsayılarını,  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N_g}$  dizi manifold matrisini ve  $M$  göndermeç dizisindeki toplam anten sayısını temsil etmektedir. Bu çalışmada göndermeç ve almaç dizileri için aynı antenler kullanılmıştır. Göndermeç tarafından odaklanan sinyal seti, her hedefin karmaşık yansıma katsayısı ile ölçeklendirilerek almaç dizisine yansıtılır. Ölçeklendirilen bu sinyalin köşegen değerlerinden oluşan  $\mathbf{D}_i = \text{diag}\{f(\theta)\}$  gibi bir matris tanımlanırsa, bu işlem

$$\mathbf{g}_i = \mathbf{D}_i \mathbf{x}(\theta). \quad (2)$$

ile ifade edilebilmektedir. Denklem (2)'de  $\mathbf{x}(\theta)$  hedef olan ızgara noktalarında Radar kesit alan (RKA) değerlerini içerirken, hedefin bulunmadığı açılarda 0'lardan oluşan bir vektördür.  $\mathbf{g}_i \in \mathbb{C}^{N_g \times 1}$  ise çarpım sonucunu temsil etmektedir.

### C. Almaç Sinyal Modeli

Hedeflerden yansıyan sinyal almaç dizisindeki antenlere ulaşarak uyumlu filtreden geçirilerek örneklenmektedir. Sinyal,

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{A} \mathbf{g}_i + \mathbf{n}_i = \mathbf{A} \mathbf{D}_i \mathbf{x}(\theta) + \mathbf{n}_i, \quad i = 1, \dots, N_b \quad (3)$$

ile ifade edilmektedir [10]. Denklem (3)'te  $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  vektörü  $i$  numaralı huzme için hedeften yansıyıp  $N$  almaç anteni tarafından örneklenen sinyali,  $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  gürültüyü,  $N_b$  gönderilen huzme sayısını temsil etmektedir. Her huzme için yansıyan sinyaller,  $\mathbf{y}_i$ , alt alta dizilirse  $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N N_b \times 1}$  vektörü elde edilmektedir. Benzer şekilde örneklenen gürültülerin,  $\mathbf{n}_i$ , alt alta dizilmesiyle  $\tilde{\mathbf{n}} \in \mathbb{C}^{N N_b \times 1}$  vektörü elde edilir. Bu durumda, örnekler için sinyal modeli

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{N_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \mathbf{D}_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{A} \mathbf{D}_{N_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{N_b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{n}_1 \\ \mathbf{n}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{n}_{N_b} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ifadesine dönüşmektedir. Denklem (4)'te her bir  $\mathbf{x}_i$  vektörünün genliğinin aynı, fazının ise farklı zamanlarda örneklemeden dolayı rasgeledir. Denklem (4)'ten de görülebileceği üzere sistem modeli için blok köşegen bir matris elde edilmektedir. Köşegenin her bir elemanı  $\mathbf{A} \mathbf{D}_i \in \mathbb{C}^{M \times N_g}$  olarak ifade edilmektedir. Hedef dağılımı ızgara noktaları üzerinden tanımlansa da, çalışmada hedefler ızgarasız olarak oluşturulmuştur.

## III. YÖNTEM

### A. Göndermeç Anten Katsayıları

Göndermeç anten katsayıları için klasik huzme şekillendirme ve rasgele faz büyüklüklü katsayılar olmak üzere 2 farklı yöntem uygulanmıştır. Klasik huzme şekillendirme yönteminde, huzmenin genliği, ana huzme genişliği ve yan huzmenin en büyük noktası arasında bir ödünleşim bulunmaktadır. Kullanılan anten sayısının azalması hem gönderilen gücü

azaltmakta, hem de huzmenin odak noktasındaki genliğini düşürmektedir.

$PH - MIMO$  için tam anten dizisi eş örtüşmeli parçalara bölünerek alt diziler oluşturulmuştur. Her bir alt dizi, huzme sayısı kadar noktayı sırasıyla aydınlatmaktadır. Antenler arasındaki mesafeden dolayı fazlı dizi antenler faz farklarıyla sinyali alacaklardır.  $\mathbf{A}$  matrisinin sütunları uzayda belirtilen ızgara noktasında bir hedef olsaydı ve bu hedeften bir sinyal alınsaydı, antenlerin örnekleyeceği büyüklükleri vermektedir.  $\mathbf{A}$  matrisi, 5 ile gösterilmektedir.

$$\mathbf{A} = 1/\sqrt{M}[\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_{N_g})] \quad (5)$$

Denklem (5), bütün ızgara noktaları için örneklenebilecek işareti gösterdiğinden huzmenin istenilen noktalar için  $\mathbf{a}(\theta_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_g$ , elde edilmesi gerekir. Yancanın  $0^\circ$ 'ye odaklandığı varsayımı altında yükseliş açıları için 6 ile anten dizisindeki elemanların faz bilgisine yer verilmektedir.

$$\mathbf{a}(\theta_i) = [1 \ e^{jp(\theta_i)} \ e^{j2p(\theta_i)} \dots \ e^{j(M-1)p(\theta_i)}]^T \quad (6)$$

Denklem (6) ile verilen vektör için  $p(\theta_i) = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\theta_i)$  şeklindedir. Bu durumda, odaklanılmak istenen açılar, denklemde yerine koyularak anten katsayıları elde edilmiş olunur. Rasgele faz büyüklüklü katsayılar için genlik olarak antenlerin ulaşabileceği en yüksek değer seçilmiştir. Fazları da radyan cinsinden üniform şekilde  $\mathbb{U}[0, 2\pi]$  dağılmıştır [11]. Bu durumda, ızgara noktaları üzerinde ortalama aydınlatma değerleri ve ortalama sapma değerleri elde edilir.

#### B. Hedeflerin Üretilmesi

İzgara noktalarının,  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında  $\cos(\theta)$  üzerinden eş olarak dağıldığı varsayımı altında,  $K$  adet hedef  $30^\circ$  ile  $150^\circ$  arasında rasgele şekilde üretilmektedir.  $0^\circ$  ve  $180^\circ$ 'ye yaklaştıkça antenlerin yönlülüğü bozulacaktır. Bu nedenle hedeflerin belirli açılar arasında üretildiğini varsayılmıştır.

#### C. Sinyal-Gürültü-Oranı Tanımı

Girdi SGO değeri, RKA parametresinin gürültü standart sapmasını bölümü olarak tanımlanmış ve birim RKA değeri ile istenilen SGO seviyesi elde edilecek şekilde beyaz Gauss gürültüsünün standart sapması hesaplanmıştır [7].  $Z$  adet alt dizinin olduğu ve her dizide  $M - Z + 1$  antenin olduğu durumda [7], bir huzme için anten katsayılarının genlikleri, 7 ile ifade edilir.

$$\mathbf{W} = \alpha \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

Anten başı güç limitleri hesaba katıldığında, alt diziler tarafından ortak kullanılan antenler, ortak kullanıldığı alt dizisi sayısı kadar farklı dalga biçimleri yayınlayacağı için antenlerin ölçeklendirilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bir anten en fazla  $\min(Z, M - Z + 1)$  alt dizi tarafından ortak kullanılmaktadır. Buna göre ölçeklendiğinde, almaç tarafında örneklenen ve uyumlu süzgeçlerden geçirilen sinyalin genliği, 8 ile ifade edilir:

$$\mathbf{y} = \frac{(M - Z + 1)\sigma_s}{\sqrt{\min(Z, M - Z + 1)}} \mathbf{11}^T \quad (8)$$

Evreyumlu entegrasyon sonucunda, sinyal gücü 9 ile gösterilir:

$$\mathbf{E}(P_{\text{sinyal}}) = \left( \frac{(M - Z + 1)}{\sqrt{\min(Z, M - Z + 1)}} Z N \sigma_s \right)^2 \quad (9)$$

$Z$  adet uyumlu süzgeç tarafından örneklenen gürültünün gücü  $Z N \sigma_n^2$  şeklindedir.  $PH - MIMO$  sisteminin teorik SGO değeri, 10 ile ifade edilir.

$$SGO_{PH-MIMO} = \frac{Z(M - Z + 1)^2}{M^2 \times \min(M - Z + 1, Z)} \times SGO_{PH} \quad (10)$$

#### D. Geriçatım Yöntemleri

Geriçatım yöntemleri olarak klasik huzme şekillendirme ( $BF$ ),  $SA$  tabanlı yöntemlerle  $Grup$  ve  $Ayrık$  çözümler kullanılmıştır.  $BF$  geriçatım tekniği için tam fazlı dizi manifold matrisi ve göndermeç tarafından  $N_b$  kadar gönderilen huzmenin almaç tarafından alınması gerekmektedir. Denklem (11) ile ızgara noktalarına düşen değerler evreyumlu olmayan entegrasyon ile bulunmuştur:

$$BF_{grid \ i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_b} (\mathbf{a}_i^H \mathbf{y}_j)^2}, i = 1, \dots, N_g \quad (11)$$

$\mathbf{a}_i$  ile dizi manifold matrisinin  $i$ . sütununun kullanıldığı gösterilmektedir.  $Grup$  çözümleri için optimizasyon problemi, 12 ile ifade edilmiştir.

$$\min_x \|\mathbf{x}\|_{2,1} \text{ s.t. } \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2 \leq \sigma \quad (12)$$

Seyrek çözümün olduğu varsayımı altında, en az sayıda ızgara noktasının  $0^\circ$ 'dan çok daha büyük enerjisi olması gerekir. Her ızgara noktasında, farklı vektörlerden oluşan grubun enerjisini  $\ell_2$ -norm ile bulmakta ve grup enerjisi üzerinde seyrekliği teşvik etmektedir [12]. Kısıt fonksiyonu ile gürültü üzerinde sınırlamalar getirilmektedir. Denklem (12)'de kısıt fonksiyonunda yer alan  $\mathbf{A}\mathbf{x}$  ifadesi, 4 de yer alan gürültüsüz kısmı temsil etmektedir. Hedefin kesit-alanı, huzmeden huzmeye aynı genlikte farklı fazda büyüklüklere sahip olacağı ve toplam  $N_b$  huzme için açılal olarak konum değiştirmeyeceği varsayımı ile yükseliş açısı bulunur.  $Ayrık$  çözüm için optimizasyon problemi, 13 ile ifade edilir.

$$\min_{\mathbf{x}_i} \|\mathbf{x}_i\|_1 \text{ s.t. } \|\mathbf{A}\mathbf{x}_i - \mathbf{y}_i\|_2 \leq \sigma_i, i = 1, 2, \dots, N_b \quad (13)$$

Her huzme için 13 tekrarlanır ve sonrasında  $BF$  yönteminde olduğu gibi ızgara noktaları üzerinden evreyumlu olmayan entegrasyon işlemleri uygulanarak geriçatım sonucu elde edilir.  $SA$  tabanlı yöntemler için hızlı yakınsama özelliği sebebiyle Yön Değiştiren Çarpınlar Yöntemi ( $YDÇY$ ) kullanılmıştır [13].

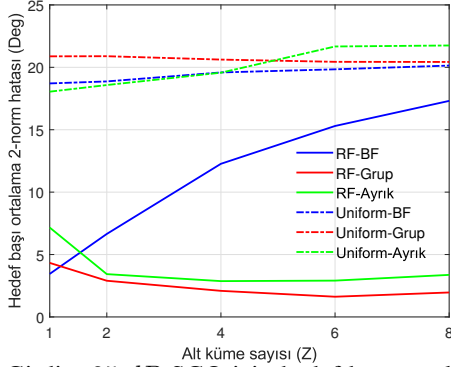
#### E. Hata Tanımı

Benzetim işlemlerinin sonunda, her bir deneyin sonucunda geliş açısı kestirimi yapılmaktadır [8]. Geliş açısı kestirimi ile hedeflerin gerçek değeri arasındaki fark hesaplanarak kestirim hatası bulunmaktadır.  $MC$  adet rasgele üretilen senaryoda Monte Carlo iterasyonları tekrarlanır. Geriçatım kullanılarak kestirilen  $K$  hedef konumu ( $\mathbf{x}_{opt}(i)$ ) ile gerçek hedef konumları ( $\mathbf{x}_{true}(i)$ ) kullanılarak ortalama hedef başı  $\ell_2$ -norm hataları, Denklem 14 ile ifade edilmiştir:

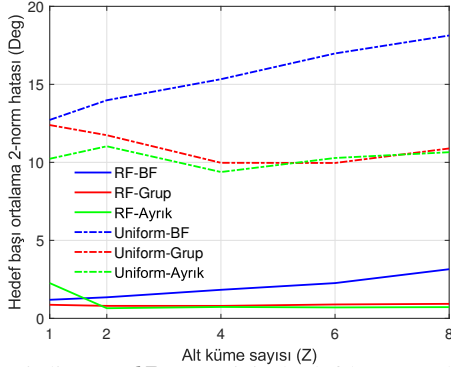
$$\mu_{err} = \frac{\sum_{i=1}^{MC} \|\mathbf{x}_{opt}(i) - \mathbf{x}_{true}(i)\|_2}{MC \times K} \quad (14)$$

#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

Göndermeç anten sayısı ( $M$ ) ve almaç anten sayısı ( $N$ ), 64 olarak seçilmiştir. Izgara nokta sayısı ( $N_g$ ), gönderilen huzme sayısı ( $N_b$ ), hedef sayısı ( $K$ ); sırasıyla 512, 4 ve 3 olarak seçilmiştir. Hedefler için RKA genlikleri 2/3,1 ve 4/3 olarak seçilmiştir. Girdi SGO ( $\sigma_s^2/\sigma_n^2$ ) değerleri için  $-25$  dB ve  $-15$  dB seçilmiştir. Alt dizilerin sayısının ( $Z$ ); 1,2,4,6,8 olduğu durumlarda deneyler yapılmıştır. Monte Carlo (MC) iterasyon sayısı 3000 olarak seçilmiştir.



Şekil 2: Girdi  $-25$  dB SGO için hedef başı ort. kare hataları.



Şekil 3: Girdi  $-15$  dB SGO için hedef başı ort. kare hataları.

Şekil 2 ve 3 için alt dizi sayısının artışıyla (aynı zamanda alt dizilerde yer alan anten sayılarının azalmasından dolayı) klasik huzme şekillendirme ile kestirim (BF) performansının tüm geriçatım yöntemlerinde kötüleştiği gözlenmektedir. Yine iki tabloda da görüldüğü gibi, bütün yöntemler ortalamada benzer ölçülen SGO değeri ile çalışmaktadır. Bunun temel sebebi,  $M$  sayısına kıyasla nispeten düşük  $Z$  değerlerinde çalışılmasıdır. Ancak, örneğin  $-15$  dB için Uniform yönteminin SGO değerinin standart sapması sırasıyla 13.3, 6.4, 3.0, 1.9 ve 1.4; RF yönteminin ise sırasıyla 2.2, 0.8, 0.3, 0.1, 0.1 olmaktadır. Yani ölçülen SGO için 1-) Uniform yöntemlere kıyasla RF yöntemlerin çok düşük standart sapmaya sahip olduğu, 2-) alt dizi sayısı arttıkça standart sapmanın düştüğü gözlenmektedir. Bu yüksek standart sapma, Uniform yönteminin RF yöntemine kıyasla ortalama kestirim hatasının yüksekliğine sebep olmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, SA tabanlı yöntemlerden grup çözüm, ayrık çözüme göre daha iyi kestirim performansı göstermiştir. SA tabanlı yöntemler, BF yöntemine kıyasla çok daha iyi başarımlar göstermiştir. Buna ek olarak, alt dizi sayısının artışıyla GAK başarımı iyileşmektedir. Ancak burada  $Z$  sayısının artışıyla gönderilen dalga biçimi sayısı ve uyumlu süzgeç sayısı da artmaktadır. Benzer performans artışı ayrık çözümde de görülse de, burada artış düzenli olmamaktadır. Şekil 3'ye bakıldığında ise, girdi

SGO değeri yeterli geldiği için, bütün yöntemler çok daha iyi başarımlar göstermiştir. Özellikle  $Z = 1$  durumunda bile, grup çözüm elde edebileceği en iyi performansa yakındır. Bu sebeple yüksek SGO durumu altında, donanım karmaşıklığını arttırmaya gerek olmayabilir.

#### V. TARTIŞMA

Bu çalışmada, PH-MIMO sistemlerinin getirdiği ekstra donanım karmaşıklığına karşın gelişi kestirim performansı değerlendirilmiştir. Bu amaçla anten başına düşen gücün eşit olduğu bir senaryo altında kıyaslama yapılmıştır. GAK performanslarını incelediğimizde RF gönderme katsayılarının Uniform'a kıyasla daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. PH-MIMO dalga biçimi ve uyumlu süzgeç sayıları açılardan donanım karmaşıklığını arttırmaktadır. Ancak, özellikle düşük SGO değerinde PH-MIMO sisteminin avatajlı olacağı düşünülmektedir. Buna ek olarak, RF katsayıları için ölçülen SGO değerlerinin alt dizi sayısının artmasıyla beraber daha kararlı hale geldiği ve GAK performansının iyileştiği görülmektedir. Yine de, özellikle  $-15$  dB SGO altında, performans artışı limitli olmaktadır. Son olarak, SA tabanlı grup çözümün konvansiyonel BF ve ayrık çözüme kıyasla daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. İleri çalışmalarda, bu sistem üzerinde farklı göndermeç anten katsayılarının tasarımı gerçekleştirilecek ve performans çıktıları incelenecektir. Oluşturulacak anten katsayılarıyla, SA tabanlı sistemlerden elde edilecek GAK performanslarının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] H. Krim and M. Viberg, "Two decades of array signal processing research: the parametric approach," in IEEE Sig. Proc. Mag., vol. 13, no. 4, pp. 67-94, July 1996.
- [2] W. Kederer and J. Detlefsen, "Direction of arrival (DOA) determination based on monopulse concepts," 2000 Asia-Pacific Microwave Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8522), Australia, 2000, pp. 120-123.
- [3] Q. Yuan, Q. Chen and K. Sawaya, "Accurate DOA estimation using array antenna with arbitrary geometry," in IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 53, no. 4, pp. 1352-1357, April 2005.
- [4] N. H. Lehmann et al., "Evaluation of Transmit Diversity in MIMO-Radar Direction Finding," in IEEE Trans. on Sig. Proc., vol. 55, no. 5, pp. 2215-2225, May 2007.
- [5] A. Katalinic, R. Nagy and R. Zentner, "Benefits of MIMO Systems in Practice: Increased Capacity, Reliability and Spectrum Efficiency," Proceedings ELMAR 2006, Croatia, 2006, pp. 263-266.
- [6] J. P. Browning, D. R. Fuhrmann and M. Rangaswamy, "A Hybrid MIMO Phased-Array Concept for Arbitrary Spatial Beampattern Synthesis," 2009 IEEE 13th Digital Signal Processing Workshop and 5th IEEE Sig. Proc. Ed. Work., USA, 2009, pp. 446-450.
- [7] A. Hassanien and S. A. Vorobyov, "Phased-MIMO Radar: A Tradeoff Between Phased-Array and MIMO Radars," in IEEE Trans. on Sig. Proc., vol. 58, no. 6, pp. 3137-3151, June 2010.
- [8] B. Kılıç, A. Güngör, M. Kalfa and O. Arkan, "Adaptive Measurement Matrix Design in Compressed Sensing Based Direction of Arrival Estimation," 2020 28th EUSIPCO, Netherlands, 2021, pp. 1881-1885.
- [9] M. Greenspan, "Potential pitfalls of cognitive radars," 2014 IEEE Radar Conference, USA, 2014, pp. 1288-1290, doi: 10.1109/RA-DAR.2014.6875797.
- [10] S. Haykin, J. Litva, and T. J. Shepherd, *Radar Array Processing*. New York: Springer-Verlag, 1993.
- [11] K. H. Sayidmarie and Q. H. Sultan, "Synthesis of wide beam array patterns using random phase weights," 2013 ICECCPCE, Iraq, 2013, pp. 52-57.
- [12] S. Liu, Y. Liu, Y. Zhang and T. Tan, "Compressive data gathering in wireless sensor networks via group sparse regularization," 2017 IEEE ICC, France, 2017, pp. 1-5.
- [13] M. V. Afonso, J. M. Bioucas-Dias and M. A. T. Figueiredo, "An Augmented Lagrangian Approach to the Constrained Optimization Formulation of Imaging Inverse Problems," in IEEE Trans. on Image Proc., vol. 20, no. 3, pp. 681-695, March 2011.